



## جبران سازی لغزش رخ داده در گرفتن اجسام توسط پنجه ربات

حبیب احمدی<sup>1\*</sup>، هانیه اسماعیلی<sup>2</sup>، محمد مهدی فاتح<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود  
3- استاد، مهندسی کنترل، دانشگاه شاهرود، شاهرود  
\* شاهرود، صندوق پستی 316، habibahmadif@shahroodut.ac.ir

### چکیده

عمل گرفتن در پنجه ربات هم در دست‌های مصنوعی و هم در ربات‌های صنعتی انجام می‌شود که در تمام آن‌ها مسئله لغزش به‌عنوان یک پدیده نامطلوب در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، به‌منظور کنترل لغزش و تضمین رفتار حلقه بسته مطلوب، از کنترل گشتاور محاسبه‌شده استفاده شده است. با وجود این، مانورهای مختلف برای ردیابی مسیر در فضای کار توسط ربات، باعث ایجاد شتاب بر روی جسم گرفته‌شده خواهد شد و این تغییرات شتاب باعث لغزش جسم گرفته‌شده خواهد شد. لذا، اعمال کنترل‌کننده به ربات، جهت ردیابی مسیر مطلوب، بر روی موقعیت جسم نسبت به پنجه اثر می‌گذارد. هرچند کنترل‌کننده گشتاور محاسبه‌شده برای تعقیب مسیر مطلوب بسیار خوب عمل می‌نماید، اما، با توجه به لغزشی که در حین عملیات گرفتن رخ می‌دهد، این مسیر مطلوب در راستای لغزش دچار تغییر می‌شود. لذا، در این مقاله، با ارائه تمهیدی برای اصلاح مسیر مطلوب در حین عمل گرفتن، نه‌تنها کنترل لغزش صورت می‌پذیرد، بلکه جبران مقدار لغزش رخ داده نیز انجام می‌شود تا بدین ترتیب جسم در موقعیت مناسب خود قرار داده شود. در این مقاله، جبران‌سازی لغزش رخ داده به‌صورت برخط توسط پنجه ربات ارائه شده است. با این رویکرد بهبود قابلیت پنجه ربات در جابه‌جایی ایمن اجسام در فضای کار و با توجه به موقعیت جسم نسبت به انگشتان ربات تضمین می‌شود.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 13 شهریور 1393  
پذیرش: 22 مهر 1393  
ارائه در سایت: 09 آذر 1393  
کلیدواژگان:  
کنترل لغزش  
جبران لغزش  
عمل گرفتن  
جسم  
پنجه ربات

## Slip compensation of grasped objects in robot gripper

Habib Ahmadi<sup>1\*</sup>, Hanieh Esmaeeli<sup>2</sup>, Mohamad Mehdi Fateh<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran.  
2- Department of Mechanical Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran  
3- Department of Electrical and Robotic Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran  
\* P.O.B. 316 Shahrood, Iran, habibahmadif@shahroodut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 September 2014  
Accepted 14 October 2014  
Available Online 30 November 2014

Keywords:  
Slip Control  
Slip Compensation  
Grasping, Object  
Robot Gripper

### ABSTRACT

Grasping in robot gripper is an operation that is inevitably performed by prosthetic hands or industrial robots. Meanwhile, slipping of the grasped object is considered as an undesirable phenomenon in any kind of grasping. Here, the computed torque control is used in order to control slip and also guarantee the desired behavior of the closed loop system. Nevertheless, any acceleration changes of the robot's joints before completing the response time of the slip controller has a direct effect on the object position relative to the robot and causes slip phenomenon. Although the applied computed torque controller is suitable for tracking trajectory, the desired trajectory will be altered according to slip occurrence. This paper introduces a method to modify the desired trajectory during grasping an object. The modification is done according to the measured slip. These methods not only control the slip of the grasped object, but also compensate it. So the object could be handled and placed in its proper position in the task space. This approach guarantees the safe grasping and moving of objects according to object position relative to the gripper.

### 1- مقدمه

گرفتن قطعات صنعتی رخ می‌دهد این است که اجسام گرفته‌شده آزادانه می‌لغزند، می‌افتند و می‌شکنند. لغزش<sup>2</sup> در هنگام گرفتن بر اثر دلایل مختلفی همچون تغییرات در هندسه جسم، جرم، اینرسی و ضریب اصطکاک و یا ناشناخته بودن جسم به‌وجود می‌آید. تحقیقات انجام‌شده در رابطه با مسئله لغزش سه مبحث کلی را در برمی‌گیرد: انتخاب پنجه مناسب برای گرفتن، شناسایی لغزش و کنترل لغزش. انتخاب پنجه مناسب با توجه به مسائل مختلفی چون هندسه جسم،

عمل گرفتن<sup>1</sup> عبارت است از مهار یک جسم توسط دست ربات به‌نحوی که امکان جابه‌جا کردن آن در یک مسیر مطلوب وجود داشته باشد. گرفتن جسم توسط پنجه ربات یکی از این موضوعاتی است که در کاربردهای گوناگون از جمله حمل جسم ظریف، گرفتن جسم بی‌قاعده یا نامنظم و سرهم‌بندی قطعات استفاده می‌شود. از جمله مشکلاتی که برای ناتوانان جسمی به‌هنگام استفاده از دست‌های مصنوعی مکانیکی و یا برای ربات‌های صنعتی به‌هنگام

2- Slip

1- Grasping

با محرک موتور جریان مستقیم<sup>5</sup> مغناطیس دائم استفاده می‌کند. در تحقیقی دیگر با اعمال کنترل کننده عصبی فازی، که به روش برگشت به عقب آموزش داده شده، به پنجه ربات این مهارت داده می‌شود که عملیات گرفتن را به درستی و بدون لغزش و یا صدمه دیدن جسم انجام دهد [13]. در ادامه روش‌های به کار رفته برای کنترل لغزش، بعضی از محققین در طرح خود از یک کنترل کننده چندحالتی استفاده نموده‌اند تا بتواند شرایط واقعی تر لغزش بین جسم و پنجه را با توجه به شرایط اصطکاکی هر فاز، شبیه‌سازی نمایند [14، 15]. دی انگبرگ و جی میک، پس از مطالعه و اعمال کنترل کننده‌های مختلف نیرو و موقعیت بر روی دست مصنوعی دوانگشتی یک درجه آزادی، یک الگوریتم پیشگیری از لغزش تطبیقی طراحی کرده‌اند [16].

تحقیقات گذشته در زمینه گرفتن، روش‌هایی برای شناسایی و کنترل لغزش معرفی نموده‌اند، اما برای تغییر موقعیت ناشی از لغزش جسم، علاوه بر جلوگیری از لغزش، راهکاری لازم است که منجر به جبران لغزش رخ داده شود. تعابیر مختلفی از جبران لغزش شده است. در روشی، با استفاده از شناسایی ویژگی اصطکاکی سطح تماس، آستانه لغزش پیش‌بینی می‌شود و نیروهای اعمالی برای پیشگیری از لغزش تنظیم می‌شوند [17]. در مدل جیائوژینگ و همکارانش، یک پیش‌بینی کننده بلادرنگ لغزشی پیاده‌سازی شده است که نه تنها نیروهای فعال، بلکه تغییرات سرعت و شتاب و نیروهای آشوبی را نیز در نظر می‌گیرد و با کاربرد بینایی ماشین، برداشت مناسبی از وضعیت جسم گرفته شده به دست می‌آورد.

در تمام روش‌های فوق هدف گذاری روی توقف لغزش رخ داده است، در حالی که در فعالیت‌های مونتاژی و کارهایی که نیازمند دقت بالایی است، همچون جراحی با ربات، رخداد لغزش حتی برای چند میلی‌متر زیان آور است. از این رو، در تحقیق حاضر، مقدار جابه‌جایی جسم در اثر لغزش محاسبه می‌شود و روش نوینی برای جبران آن اعمال می‌شود. در این مقاله تمرکز بر روی ارائه روشی برای ثبت میزان لغزش رخ داده و اعمال تدابیر لازم برای کنترل و جبران آن است، به طوری که مسیر مطلوب مورد نظر جهت جابه‌جایی و گذاشتن جسم در موقعیت مناسب اصلاح شود.

در ادامه مطالب، بخش 2 مدل دینامیکی کل سیستم شامل ربات اسکرای 4 درجه آزادی به همراه یک درجه آزادی برای پنجه کشویی و جسم گرفته شده را ارائه می‌نماید. بخش 3 به مدل سازی دینامیکی لغزش می‌پردازد. بخش 4 کنترل ربات برای مهار لغزش را تشریح می‌کند. در بخش 5 روش نوینی برای کنترل، به منظور مهار و جبران سازی لغزش رخ داده، تشریح داده می‌شود. در بخش 6 نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شوند و در پایان، بخش 7 به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

## 2- مدل سازی سیستم

در این قسمت مدل سازی سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. به جهت فرض گرفتن ایمن جسم در تحقیق حاضر، امکان سرخوردن و لغزش جسم بر اثر وزن آن و یا تحریکی که ممکن است توسط مانور ربات در جابه‌جایی جسم در آن ایجاد شود وجود دارد. لذا، سیستم از یک ربات اسکارا و جسمی که قرار است توسط پنجه این ربات گرفته شده و در شرایط ایمن جابه‌جا شود، تشکیل شده است. در ادامه دینامیک ربات و سپس دینامیک جسم ارائه شده است.

کاربرد ربات، سطح تماس با جسم و اصطکاک تماسی انجام می‌شود [1]. بعضی از محققین عملیات گرفتن را توسط یک دست چند انگشته برای یافتن یک پیکره‌بندی مناسب جهت ارضاء شرایط انحصار نیرو<sup>1</sup> برای اجسام دلخواه مورد توجه قرار داده‌اند [2] و بعضی دیگر با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به تنظیم پارامترهای طراحی مورد نیاز برای گرفتن اجسام پرداخته‌اند [3].

برای شناسایی و تشخیص جسم و همچنین قرار گرفتن دست ربات در موقعیت مناسب نسبت به جسم، از روش‌های برگرفته از رفتار انسانی مثل روش دیداری<sup>2</sup> و لمسی<sup>3</sup> و یا از برنامه‌های از پیش تعیین شده (به صورت برخط و برون خط) جهت حرکت دست و انگشتان استفاده می‌شود. در زمینه شناسایی و ثبت لغزش، بعضی از محققین هدف خود را در طراحی حسگری برای شناسایی لغزش قرار داده‌اند. حسگر سرعت دست<sup>4</sup> جزء اولین حسگرها برای استفاده در دست‌های مکانیکی بودند که باهدف جلوگیری خودکار از لغزش جسم گرفته شده طراحی شدند و به صورت تجاری درآمدند [4]. ای جی - ام هولگ و همکاران [5] لغزش را به چند مرحله تقسیم کردند و با معرفی ترکیبی از حسگرهای لمسی به صورت ماتریسی، لغزش را پس از وقوع شناسایی نمودند. اجزای اصلی این حسگر را یک لاستیک رسانا که مقاومت آن به نیروی به کار رفته در سطح وابسته است تشکیل می‌داد. در تحقیقی با استفاده از آشکارساز دمایی ساخته شده در ابعاد میکرو برای شناسایی شارش دما، حرارت همرفتی مرتبط با جابه‌جایی جسم گرفته شده حس می‌شود و هر افزایش شاری را نشانه لغزش می‌داند [6]. در تحقیقات دیگر در این زمینه حسگرهایی چون حسگر پیزوالکتریک و حسگر ردیابی نوری نیز برای شناسایی لغزش طراحی شد [7].

به دلیل صرف زمان طراحی و هزینه اضافی حسگرها، بعضی از محققین برای ثبت میزان لغزش از تغییرات پارامترهایی چون سرعت، شتاب و نرخ تغییرات نیروی مماسی استفاده کرده‌اند [8]. علاوه بر آن، افراد دیگری چون اریک دی انگبرگ و سنفورد جی میک [9] مستقیماً از نیروی مماسی و نیروی عمود بر سطح، هم در شناسایی و هم در کنترل لغزش استفاده کردند. تمرکز اصلی آن‌ها برای شناسایی لغزش جسم، عبور مشتق نیروی مماسی از فیلتر میان‌گذر و تقویت ارتعاشات روی داده در هنگام رخداد لغزش است.

از ابتدایی ترین راهکارهایی که برای پیشگیری و کنترل لغزش رخ داده در دست ربات انسان‌نما و یا صنعتی معرفی شده، راهبرد کنترل نیروست. مارک ترمبلی و همکارانش [10] در سال 1993، با استفاده از حسگر لمسی، لغزش را در مرحله اولیه شناسایی نموده و یک کنترل کننده ترکیبی نیرو-موقعیت به کار بردند که در راستای مماسی موقعیت و در راستای عمودی نیرو را کنترل می‌نماید. بعضی از سیستم‌ها نیز [11] بر مبنای استفاده از ویژگی‌های سیستم حسگری در شناسایی نیروها و کنترل لغزش طراحی شده‌اند. استفاده از کنترل لغزش بر اساس کنترل نیرو به اینجا محدود نشد. پس از ارائه روش‌های کنترل هوشمند و از آنجا که کنترل کننده می‌تواند دارای قابلیت یادگیری از مشاهدات و تجربیات پیرامون خود باشد، تحقیقات در زمینه کنترل هوشمند زمینه کاری بسیاری از محققین شد. در این راستا فاتح راهبرد کنترل لغزش ساختار متغیر را برای گرفتن اجسام توسط نقطه نهایی ربات گسترش داده است [12]. او برای این منظور از یک کنترل کننده ترکیبی متشکل از کنترل کننده فازی و تناسبی-انترگالی برای دست ربات دوانگشتی

1- Force closure  
2- Visual  
3- Tactile  
4- Hand Speed Sensors

5- Direct Current

## 1-2- دینامیک ربات

از ربات اسکارا اغلب برای عملیات گرفتن و یا جابه‌جایی اجسام استفاده می‌شود. این ربات، بدون لحاظ درجه آزادی برای پنجه در نقطه انتهایی زنجیره، دارای 4 درجه آزادی است که شامل سه درجه مفصل لولایی و یک درجه مفصل کشویی مطابق شکل 1 است. سه درجه آزادی آن برای تعیین موقعیت مچ و پنجه و درجه آزادی چهارم برای هدایت پنجه در جهت موردنظر به‌کار می‌رود. موقعیت مفصل  $i$  ام با  $q_i$  نشان داده می‌شود. این موقعیت برای مفصل‌های لولایی برحسب رادیان و برای مفصل کشویی برحسب متر بیان می‌شود. در این مقاله جهت گرفتن اجسام یک پنجه فک موازی در نقطه نهایی ربات در نظر گرفته شده است. مفصل انگشت از نوع کشویی و دارای سطح صاف و مستطیلی شکل است. از مزایای این نوع پنجه این است که در ترکیب انگشتان موازی، نیرو بر روی سطح تماس توزیع می‌شود و احتمال پارگی یا ساییدگی جسم را کاهش می‌دهند.

به‌منظور تحلیل سینماتیکی ربات، روش استاندارد دناویت-هارتبرگ<sup>1</sup> [18] استفاده شده است. براساس روش فوق، دستگاه‌های مختصات مطابق با شکل 1 در نظر گرفته شده و پارامترهای متناظر آن در جدول 1 آمده است. با توجه به شکل 1، دستگاه مختصات  $X_0Y_0Z_0$  عنوان دستگاه مرجع و دستگاه  $X_4Y_4Z_4$  به عنوان دستگاه پنجه در نظر گرفته شده است.

با اعمال تبدیلات لازم، ماتریس انتقال همگن با استفاده از معادلات (1) و (2)، برای استفاده در سینماتیک مستقیم ربات به‌صورت ماتریس حاصل در رابطه (3) به‌دست می‌آید:

$$T_i^{i-1} = \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(Z_{i-1}, d_i) \text{Trans}(X_i, a_i) \text{Rot}(X_i, \alpha_i) \quad (1)$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

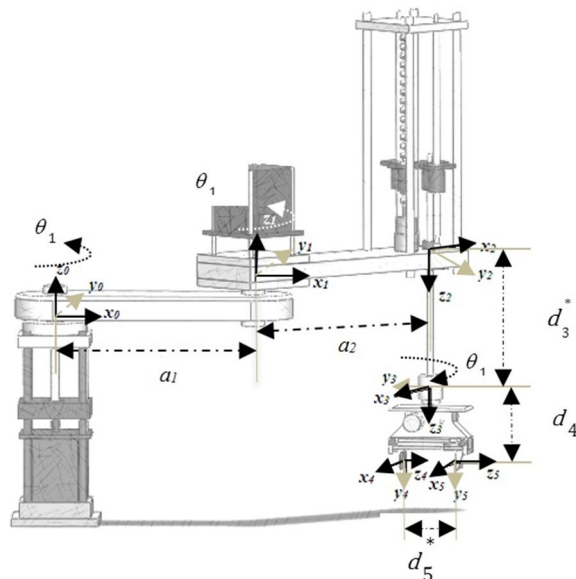
$$T = \begin{bmatrix} -C_4C_{12} - S_4S_{12} & 0 & C_4S_{12} - S_4C_{12} & C_1a_1 + q_5(C_4S_{12} - S_4C_{12}) + a_2C_{12} \\ -C_4S_{12} + S_4C_{12} & 0 & -C_4C_{12} - S_4S_{12} & S_1a_1 + q_5(-C_4C_{12} - S_4S_{12}) + a_2S_{12} \\ 0 & -1 & 0 & -d_4 - q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در این معادلات، به‌دلیل ایجاد اختصار، روابط مثلثاتی به‌صورت زیر خلاصه‌سازی شده است:

$$S_j = \sin \theta_j, S_{i,j} = \sin(\theta_i + \theta_j),$$

$$C_j = \cos \theta_j, C_{i,j} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

برای جلوگیری از پیچیدگی‌های محاسباتی و نیز ساده‌سازی معادلات غیرخطی در به‌دست آوردن معادلات دینامیکی، از روش لاگرانژ<sup>2</sup> استفاده می‌شود.



شکل 1 طرح بازوی ماهر اسکارا به‌همراه پنجه فک موازی

جدول 1 مقداردهی پارامترهای دناویت-هارتبرگ

رابط شماره $i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$a_1$	0	$q_1^*$
2	$\pi$	$a_2$	0	$q_2^*$
3	0	0	$d_3^*$	$\pi$
4	$\frac{\pi}{2}$	0	$d_4$	$q_4^*$
5	0	0	$d_5^*$	0

در روش لاگرانژ، کمیت‌های اسکالر انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل محاسبه شده و برحسب مختصات عمومی بیان می‌شوند. درنهایت، با استفاده از تابع لاگرانژ به‌صورت رابطه (4)، معادلات دینامیکی سیستم با استفاده از رابطه (5) محاسبه می‌شود:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q), \quad (4)$$

$$\tau = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} \quad (5)$$

که در روابط (4) و (5) داریم:

$L$  تابع لاگرانژ

$K$  انرژی جنبشی

$U$  انرژی پتانسیل

$q$  بردار تعمیم‌یافته مختصات مفاصل

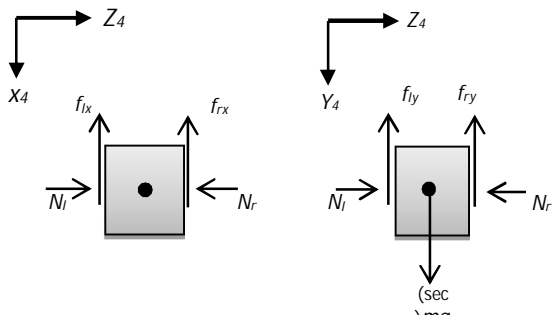
$\dot{q}$  بردار تعمیم‌یافته سرعت‌های مفاصل

$\tau$  بردار تعمیم‌یافته گشتاورها و نیروها

بنابراین، معادلات حرکت دینامیکی ربات  $n$  لینکی در تعامل با جسم با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل توسط معادله (6) بیان می‌شود.

1- Denavit- Hartenberg

2- Lagrange



شکل 2 دیاگرام آزاد جسم در دو صفحه  $X_4 - Z_4$  و  $Y_4 - Z_4$

امکان چرخش جسم در امتداد محورهای  $X_4$  و  $Y_4$  وجود ندارد. به بیانی دیگر، تقارن نیروهای فشاری و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف جسم در صفحه  $X_4 - Z_4$  باعث عدم چرخش حول محور  $Y_4$  و در صفحه  $Y_4 - Z_4$  باعث عدم چرخش حول محور  $X_4$  می‌شود.

دو بازوی ابتدایی ربات اسکارا همواره در صفحه هم‌راستا با  $Z_4$  حرکت می‌نمایند و حرکت چرخشی مفصل شماره 4 حول محور  $Y_4$  است. از طرفی، با توجه به فرض گرفتن متقارن توسط پنجه و یکسان بودن ضریب اصطکاک در دو طرف و به شرط اینکه جسم طوری توسط فک‌ها گرفته شود که مرکز جرم دقیقاً در موقعیت وسط فک‌ها قرار داشته باشد، توزیع نیروهای اصطکاکی بین جسم و انگشت در طرفین جسم در صفحه  $X_4 - Y_4$  به‌صورت متقارن و یکنواخت صورت می‌گیرد. بنابراین، نیروهای اصطکاکی، گشتاور یکدیگر را حول محور  $Z_4$  خنثی می‌کنند. لذا گشتاوری حول محور  $Z_4$  بر جسم اعمال نخواهد شد و همچنین مانورهای دیگر ربات حول محور  $Z_4$  گشتاور ایجاد نخواهد کرد؛ بنابراین جسم در این امتداد نمی‌چرخد. از این‌رو لغزش جسم بین انگشتان تنها در امتداد محورهای  $X_4$  و  $Y_4$  خواهد بود.

با توجه به مطالب فوق برای سیستم مورد مطالعه، معادلات حرکت جسم را می‌توان به‌صورت معادله (7) نمایش داد. شایان ذکر است که به‌دلیل سهولت در اندازه‌گیری مقدار لغزش رخ داده برای جسم معادلات حرکت آن در امتداد محورهای پنجه (البته در مختصات مرجع) نوشته شده است.

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{obj} \\ \dot{y}_{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{lx} - f_{rx} \\ -f_{ly} - f_{ry} + W \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در معادله فوق  $W$  و  $m$  به ترتیب معرف وزن و جرم جسم هستند.  $x_{obj}$  و  $y_{obj}$  نیز به ترتیب معرف تصویر موقعیت مطلق جسم در امتداد محورهای  $X_4$  و  $Y_4$  هستند.

### 3- مدل سازی دینامیکی لغزش

بررسی حالت‌های مختلف لغزش جسم نیازمند بررسی رفتار دینامیکی آن است. بنابر روابطی که در بخش مدل‌سازی جسم بیان شد، می‌توان حالت‌های مختلف لغزش جسم را براساس مقدار نیروهای اعمالی بر آن و حرکت نسبی جسم نسبت به پنجه تحلیل کرد. بدین منظور از تمامی نیروهای عمودی اعمالی و اصطکاکی وارد به جسم استفاده می‌شود.

برای محاسبه نیروی عمودی به‌دلیل تقارن ( $N = N_l = N_r$ ) معادله

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - J^T F = \tau \quad (6)$$

که در این معادله  $q \in \mathbb{R}^n$  بردار موقعیت مفاصل،  $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  ماتریس اینرسی ربات، جمله دوم بردار گشتاورهای کریولیس و مرکزگرا،  $G(q) \in \mathbb{R}^n$  بردار گشتاورهای گرانشی،  $\tau \in \mathbb{R}^n$  بردار گشتاورهای اعمالی به مفاصل ربات و  $F$  بردار عکس‌العمل نیروهای اعمالی از جسم به پنجه در مختصات  $X_0 Y_0 Z_0$  هستند.

### 2-2- دینامیک جسم

از آنجا که ربات اسکارای مذکور جسمی را توسط پنجه گرفته و جابه‌جا می‌نماید، در طی مانور حرکتی امکان لغزش جسم با توجه به شتاب‌های اعمالی وجود دارد؛ لذا در لحظاتی از حرکت که جسم توسط پنجه گرفته و لغزشی ندارد، شتاب آن با شتاب پنجه ربات یکسان است و در لحظاتی که جسم در حال لغزش بین انگشتان است، شتاب آن در جهات لغزش از شتاب پنجه تبعیت نمی‌کند. در این وضعیت معادلات حرکت جسم را می‌توان با توجه به شرایط لغزش نوشت [19]. در تحلیل و بررسی این مسئله فرض‌های ذیل برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

1. اجسامی که توسط ربات گرفته می‌شوند مکعبی شکل هستند و گرفتن توسط انگشتان به‌صورت متقارن است.
  2. فک‌ها همواره طوری جسم را مهار می‌کنند که مرکز جرم جسم در راستای مرکز هندسی سطح آن‌ها باشد.
  3. ضریب اصطکاک بین جسم و انگشت‌ها معلوم و در دو طرف یکسان است.
  4. توزیع نیروی اصطکاک در سطح فک یکنواخت فرض می‌شود.
  5. جسم گرفته‌شده صلب است، اما تماس انگشت و جسم به‌صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود. این خاصیت الاستیک می‌تواند مجموعه‌ای از انعطاف‌پذیری موجود در انگشت و یا سطح تماس باشد که نهایتاً به‌عنوان یک فنر معادل‌سازی شده است.
  6. نیروی اصطکاکی و عمودی بین جسم و انگشت توسط حسگرهای لمسی تعبیه‌شده در انگشتان قابل اندازه‌گیری و یا محاسبه است.
- با توجه به فرضیات فوق، دیاگرام آزاد جسم در دستگاه مختصات پنجه ربات در شکل 2 ترسیم می‌شود (شایان ذکر است دستگاه مختصات پنجه مطابق با شکل 1 دستگاه شماره 4 است). در این شکل نیروهای اعمالی در دو صفحه  $X_4 - Z_4$  و  $Y_4 - Z_4$  نشان داده شده است.

بردار  $f = [f_{rx} + f_{lx}, f_{ry} + f_{ly}, N_r + N_l]^T$  بردار نیروی اعمالی از طرف پنجه به جسم در مختصات پنجه است. شایان ذکر است  $N_l$  و  $N_r$  نیروی عمودی اعمالی از طرف انگشتان بر سمت چپ و راست،  $f_{rx}$  و  $f_{lx}$  نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس از سمت چپ و راست و در راستای  $X_4$  و  $f_{ly}$  و  $f_{ry}$  نیروهای اصطکاکی در نقاط تماس بر سمت چپ و راست جسم در راستای محور  $Y_4$  هستند.

در حالت کلی جسم در فضا شش درجه آزادی دارد، اما با توجه نوع سازوکاری که در این تحقیق برای گرفتن توسط دو فک موازی در پنجه ربات اسکارا در نظر گرفته شده است، یک درجه آزادی آن در امتداد محور  $Z_4$  با مؤلفه حرکتی پنجه یکسان بوده و با توجه به فک موازی بودن انگشتان پنجه

(8) برقرار است:

$$N = k_f (q_5 - q_{5_0}) \quad (8)$$

در رابطه فوق  $k_f$  سختی معادل برای انعطاف پذیری سیستم مورد مطالعه بوده و  $q_{5_0}$  موقعیت اولیه انگشت است.

با توجه به اینکه هدف مسئله نگهداری جسم با اعمال حداقل نیروست و جسم در معرض مانورهای مختلف ربات قرار می گیرد، وضعیت های مختلف حرکتی بین جسم و انگشتان ایجاد می شود. این وضعیت ها شامل رهایی جسم، آستانه لغزش بین جسم و انگشتان، لغزش بین آن ها و در نهایت عدم لغزش بین جسم و انگشتان است. لذا وضعیت های مختلف تماسی بین جسم و انگشتان را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد.

### 3-1- لغزش در نقاط تماس

در صورت لغزش در نقاط تماس سرعت نسبی جسم نسبت به انگشتان مخالف صفر خواهد بود که این شرط به صورت رابطه (9) بیان می شود:

$$|\dot{V}| = |\dot{x}i + \dot{y}j| > 0 \quad (9)$$

که در این رابطه  $\dot{V}$  سرعت نسبی انگشتان نسبت به جسم و  $\dot{X} = \dot{X}_{grip} - \dot{X}_{obj}$  و  $\dot{Y} = \dot{Y}_{grip} - \dot{Y}_{obj}$  به ترتیب مؤلفه های آن در راستای محور  $X_4$  و  $Y_4$  هستند. شایان ذکر است  $\dot{X}_{grip}$  و  $\dot{Y}_{grip}$  مؤلفه های سرعت پنجه در راستای محورهای  $X_4$  و  $Y_4$  هستند. شرط فوق به معنی وجود لغزش بین جسم و پنجه بوده و در نتیجه برآیند نیروهای اصطکاکی در هر سطح با استفاده از رابطه اصطکاک کولمبی یعنی  $\mu_r N$  و  $\mu_l N$  به دست می آید که در این روابط  $\mu_r$  و  $\mu_l$  به ترتیب ضریب اصطکاک سمت راست و چپ جسم است. حال، برای اینکه بتوان مؤلفه های نیروی اصطکاکی را در جهت  $X_4$  و  $Y_4$  به دست آورد، باید به این نکته توجه کرد که به علت وجود سرعت نسبی بین جسم و انگشتان، راستای نیروی اصطکاکی و سرعت نسبی در هر سمت هم ارز است؛ لذا می توان مؤلفه های نیروی اصطکاک را با توجه به راستای مؤلفه های سرعت نسبی به دست آورد. بنابراین، با توجه به اینکه نسبت به جسم در راستای  $Y_4$  و  $X_4$  هستند، می توان مؤلفه های نیروی اصطکاکی را با معادلات (10) نمایش داد.

$$\begin{aligned} f_{lx} &= \frac{-\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{ly} &= \frac{-\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{rx} &= \frac{-\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_r N| \\ f_{ry} &= \frac{-\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \times |\mu_r N| \end{aligned} \quad (10)$$

### 3-2- عدم لغزش

در حالتی که نیروی عمودی کافی جهت مهار جسم توسط انگشتان اعمال شود، شتاب جسم با شتاب پنجه برابر شده و در نتیجه حرکت انگشتان مستقیماً به جسم اعمال می شود. بنابراین، در این وضعیت دو قید، مطابق رابطه (11)، بر رفتار سیستم حاکم خواهد بود.

$$\begin{aligned} X_{obj} &= X_{grip} \\ Y_{obj} &= Y_{grip} \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه (11)،  $X_{obj}$  و  $X_{grip}$  تصویر موقعیت جسم و پنجه در راستای  $X_4$  و  $Y_{obj}$  و  $Y_{grip}$  تصویر موقعیت جسم و پنجه ربات در راستای  $Y_4$  است. لذا، با توجه به برقراری قیود فوق، می توان شتاب جسم را به دست آورده و با لحاظ فرض تقارن در سیستم، معادلات حرکت جسم را برای به دست آوردن نیروهای اصطکاکی به کار برد.

### 3-3- آستانه لغزش

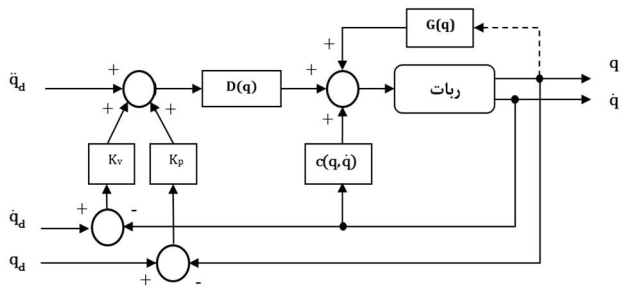
اگر شرط  $|\dot{V}| = |\dot{x}i + \dot{y}j| = 0$  و  $|\ddot{a}| = |\ddot{x}i + \ddot{y}j| \neq 0$  برقرار باشد، علی رغم سرعت نسبی صفر بین جسم و پنجه، مجموع نیروهای اعمالی بر جسم از ظرفیت اصطکاکی در نقاط تماس بیشتر شده و با ایجاد یک شتاب نسبی، جسم را در آستانه لغزش قرار می دهد. در این وضعیت نیز رابطه اصطکاک کولمبی برای محاسبه نیروی اصطکاکی برقرار خواهد بود، با این تفاوت که روش تعیین جهت و راستای آن با توجه به اینکه سرعت نسبی صفر است از روی شتاب جسم نسبت به انگشتان به دست می آید. با توجه به اینکه اندازه برآیند نیروی اصطکاکی در هر سطح  $\mu_r N$  و  $\mu_l N$  است، می توان نیروهای اصطکاک  $f_{lx}$ ،  $f_{ly}$ ،  $f_{rx}$  و  $f_{ry}$  را با توجه به راستای شتاب نسبی به صورت رابطه (12) تعریف کرد:

$$\begin{aligned} f_{lx} &= \frac{\ddot{x}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{ly} &= \frac{\ddot{y}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_l N| \\ f_{rx} &= \frac{\ddot{x}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_r N| \\ f_{ry} &= \frac{\ddot{y}}{\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2}} \times |\mu_r N| \end{aligned} \quad (12)$$

توضیح این نکته لازم است که فاز آستانه لغزش، مرز بین لغزش و عدم لغزش است؛ از این رو می توان آن را معادل با فاز عدم لغزش و یا لغزش فرض نمود. لذا هر دودسته معادلات در فازهای فوق برای فاز آستانه لغزش نیز صادق خواهند بود.

### 4- کنترل برای مهار لغزش

در این بخش روش کنترلی گشتاور محاسبه شده برای اهداف ردیابی مورد استفاده قرار می گیرد. برای محقق شدن این امر، با توجه به روشی که در ادامه بیان شده است، مسیر مطلوب برای انگشت با توجه شرایط مطلوب برای گرفتن ایمن جسم به دست آمده است.



شکل 3 بلوک-دیگرام CTC برای بازوی ماهر

مطلوب سرعت و شتاب جسم نسبت به ربات صفر شود، لذا برای برقراری کنترل لغزش، نیروی گرفتن جسم تنها به موقعیت مطلوب پنجه ربات وابسته می‌شود. برای رسیدن به این هدف دو راهکار متفاوت وجود دارد. در راهکار اول، پس از شناسایی لغزش به کمک یکی از روش‌های شناسایی گفته‌شده در بخش (1)، لغزش از جنس نیرو یا شتاب شناسایی می‌شود و سپس، با قرار دادن یک کنترل کننده نیرو یا شتاب مناسب، موقعیت مطلوب پنجه با ورودی شتاب یا نیرو کنترل می‌شود. در راهکاری دیگر، می‌توان با توجه به مودهای مختلف لغزشی ارائه‌شده در قسمت قبل و استفاده از روابط مربوطه لغزش را شناسایی نمود و بین نیروی اعمالی و موقعیت مطلوب پنجه رابطه‌ای منطقی برقرار کرد. در روش پیشنهادی این مقاله راهکار دوم به کار برده شده است.

#### 2-4- تعیین مسیر مطلوب برای حرکت انگشتان

مسیر مطلوب این ربات به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که بتواند به‌خوبی گویای جبران رخداد لغزش در اثر جابه‌جا شدن جسم باشد. موقعیت مطلوب مفاصل 1 تا 4 به‌صورت دلخواه و با رعایت قیود عملکرد اعمال می‌شود، ولی مقدار مطلوب موقعیت انگشت با توجه به شتاب اعمالی به جسم در اثر حرکت بازوها و وزن جسم محاسبه می‌شود.

شتاب مطلوب حرکت جسم  $a_{obj}^d$  در فاز عدم لغزش همان شتاب اعمالی به پنجه در زمانی است که مفاصل‌های 1 تا 4 در موقعیت مطلوب خود قرار دارند و از معادلات دینامیکی ربات به‌دست می‌آید. مؤلفه‌های این شتاب  $a_{obj,x}^d$ ،  $a_{obj,y}^d$  و  $a_{obj,z}^d$  می‌باشند که تصویر شتاب‌های مطلق جسم به-ترتیب در راستای  $X_4$ ،  $Y_4$  و  $Z_4$  هستند (مطابق با رابطه (16)).

$$\begin{aligned} a_{obj,x}^d &= a_{grip,x} \\ a_{obj,y}^d &= a_{grip,y} \\ a_{obj,z}^d &= a_{grip,z} \end{aligned} \quad (16)$$

حال، به‌منظور کنترل لغزش و جلوگیری از رخداد آن، می‌بایست نیروی اعمالی به جسم، جبران‌کننده مجموع نیروی وزن جسم و نیروی اینرسی حاصل از شتاب بازوها شود؛ که این نیروها با جایگذاری رابطه (16) در معادله دینامیکی جسم، یعنی معادله (7)، به‌صورت روابط (17) و (18) حاصل می‌شود.

$$f_{d,x} = m_{obj} a_{obj,x}^d + \varepsilon \quad (17)$$

$$f_{d,y} = m_{obj} g + m_{obj} a_{obj,y}^d + \varepsilon \quad (18)$$

#### 4-1- کنترل گشتاور محاسبه‌شده

دینامیک بازوی ماهر ربات شدیداً غیرخطی است و به همین دلیل طراحی کنترل کننده کارآمد برای آن مشکل است. روش‌های کنترل کلاسیک به‌خوبی شناخته شده است، اگرچه در حضور شرایط غیرخطی شدید، به‌خوبی عمل نمی‌کنند. از طرف دیگر روش‌های کنترل کننده‌های غیرخطی [20] بهتر جواب می‌دهند، اما طراحی و تحلیل‌های غیرخطی به شفافیت و سازگاری روش‌های خطی نیست.

یک روش شناخته‌شده برای بهبود رفتار بازوی ماهر برای اهداف ردیابی، روش کنترل گشتاور محاسبه‌شده است و از این پس برای رعایت اختصار  $CTC^1$  نامیده می‌شود. در این روش، قانون کنترل، به‌منظور جبران جملات غیرخطی در روابط دینامیک ربات و تضمین رفتار حلقه بسته مطلوب، صریحاً براساس مدل به‌دست می‌آید. با استفاده از کنترل گشتاور محاسبه‌شده می‌توان به معادلات حلقه بسته خطی دست یافت که با انتخاب مناسب ضرایب، پایداری حل تضمین خواهد شد.

اگر مسیر مطلوب حرکت ربات با  $q_d(t)$  نشان داده شود، آنگاه خطای ردیابی به‌صورت رابطه (13) تعریف می‌شود:

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (13)$$

قانون کنترل گشتاور محاسبه‌شده به‌صورت رابطه (14) است:

$$\tau = D(q) [\ddot{q}_d + K_v \dot{e} + K_p e] + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) - J^T F \quad (14)$$

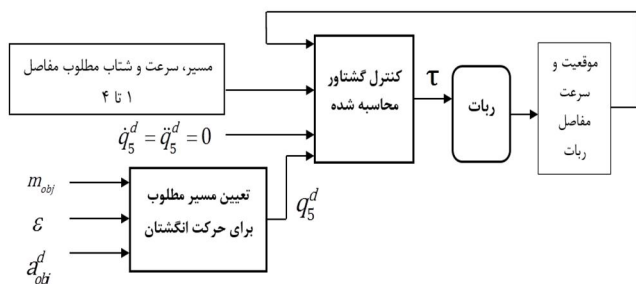
که در آن  $K_p$  و  $K_v$  به ترتیب ماتریس‌های متقارن مثبت هستند و با این تعریف پایداری سیستم حلقه بسته تضمین خواهد شد. خطای موقعیت مفصل ربات،  $e(t) = q_d(t) - q(t)$  و خطای سرعت  $\dot{e}(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)$  تعریف می‌شود. قانون کنترل (14) دربردارنده جمله  $K_v \dot{e} + K_p e$  است که خود از نوع کنترل کننده تناسبی- مشتقی است؛ اما پس از ضرب این جمله در ماتریس اینرسی  $D(q)$ ، بهره موقعیت و سرعت، دیگر ثابت نبوده که این خود، ماتریس بهره را به‌صورت مناسب در وضعیت‌های کشیدگی با مقدار بیشتر و در وضعیت‌های جمع شدگی با مقدار کمتر، تنظیم می‌نماید و مقدار این عبارت به خطای موقعیت بستگی می‌یابد. از این‌رو نمی‌توان آن را یک کنترل کننده خطی همچون تناسبی- مشتقی به‌حساب آورد، بلکه این کنترل-کننده به‌طور مناسب ضرایب را تنظیم می‌نماید.

با جایگذاری قانون کنترل (14) در معادله دینامیکی ربات (6) رابطه دینامیک خطای کنترل (15) به‌دست می‌آید:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (15)$$

با توجه به معادله (15) و بنابر نظریه پایداری سیستم‌های خطی، با انتخاب  $K_p$  و  $K_v$  به‌عنوان ماتریس‌های متقارن مثبت، همگرایی خطای ردیابی به صفر تضمین می‌شود. بلوک-دیگرام نشان‌دهنده CTC برای بازوی ماهر در شکل 3 نشان داده شده است.

برای گرفتن و مهار لغزش جسم توسط پنجه ربات لازم است نیروی مورد نیاز از طرف آن بر جسم اعمال شود. لذا، با توجه اینکه کنترل کننده CTC تابعی از موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب مفاصل ربات است، می‌توان با وابسته کردن نیروی گرفتن جسم به این مقادیر مطلوب در پنجه ربات، هر لحظه لغزش را کنترل نمود. لازمه نداشتن لغزش این است که مقادیر



شکل 4 بلوک- دیاگرام کنترلی در جهت مهار لغزش

اصلاح مسیر حرکت برای جبران لغزش در امتدادهای فوق است. با توجه به امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع، جبران لغزش ایجاد شده در امتداد محور  $Y_4$  را می‌توان با اصلاح مسیر مفصل کشویی 3 جبران نمود. همچنین، برای جبران لغزش رخ داده در امتداد محور  $X_4$  بایستی مسیر مفصل 1 و 2 را طوری اصلاح نمود که این لغزش را در امتداد  $X_4$  جبران نماید. در این خصوص لازم است که مقدار لغزش در امتداد  $X_4$  را در مختصات مرجع بیان نمود و از طریق سینماتیک معکوس مقادیر لازم برای اصلاح مسیر مفصل 1 و 2 را به دست آورد. از طرف دیگر تغییر مسیر مطلوب مفصل 1 و 2 باعث تغییر جهت گیری نهایی مورد نظر در پنجه می‌شود. لذا، لازم است مسیر مطلوب مفصل چرخشی 4 نیز با توجه به تغییرات فوق به نحوی اصلاح شود که این انحراف از جهت گیری نهایی پنجه را جبران نماید.

#### 6- شبیه‌سازی

در این بخش، برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی و روش جبران-سازي لغزش بیان شده در بخش 5، مانوری برای ربات در نظر گرفته می‌شود که شرایط ایجاد لغزش را برای جسم گرفته شده فراهم نماید تا از این طریق قابلیت کنترل کننده و روش ارائه شده جهت جبران لغزش بررسی شود. در این شبیه‌سازی، براساس کاربرد و نیازهای فضای کار، یک ربات اسکارای 4 درجه آزادی با پیکره‌بندی R-R-P-R1 به همراه یک درجه آزادی در پنجه با مفصل کشویی به کار برده شده است. این ربات اسکارای توسعه یافته توسط پنجه فک موازی با قابلیت حرکت انگشتان در طی مانور ربات، دارای مشخصات نشان داده شده در جدول 2 است. همچنین، جسم گرفته شده، صلب و مکعب مستطیل شکل است که با انگشتان ربات تماس سطحی برقرار می‌کند و تماماً از ویژگی‌هایی که در بخش 2-2 عنوان شد پیروی می‌نماید.

#### 6-1- نتایج شبیه‌سازی با اعمال کنترل کننده برای مهار لغزش

با توجه به اهداف شبیه‌سازی در کنترل و مهار لغزش، مسیر مطلوب برای مفصل 1 تا 4 ربات مطابق با شکل 1 از پیوست در نظر گرفته می‌شود. همچنین، موقعیت مطلوب انگشت (شکل 5) نیز برای کاربرد در کنترل کننده CTC مطابق با رابطه (14) تولید می‌شود.

پس از اعمال کنترل کننده برای گرفتن جسم و مهار لغزش آن، مقدار خطای ردیابی مسیر برای مفصل 1 تا 5 محاسبه شده است و نتایج آن در شکل 6 آمده است.

که در روابط (17) و (18)،  $f_{d_x}$  و  $f_{d_y}$  به ترتیب نیروهای لازم برای کنترل لغزش در راستای  $X_4$  و  $Y_4$  هستند. به این ترتیب اندازه بیشینه نیروی مماسی مطلوب برای کنترل لغزش جسم و برقراری ایمنی در هنگام گرفتن جسم در تمام جهت‌های احتمالی لغزش به صورت رابطه (19) است.

$$f_d = \sqrt{f_{d_x}^2 + f_{d_y}^2} \quad (19)$$

بنابراین نیروی عمودی مطلوبی که از طرف انگشت ربات و در جهت عمود بر جسم وارد می‌شود تا از لغزش آن جلوگیری کند از تقسیم اندازه  $f_d$  بر ضریب اصطکاک سطح تماس مطابق با رابطه (20) به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{f_d}{\mu} \quad (20)$$

همچنین، با توجه به رابطه (8) مقدار نیروی عمودی مطلوب انگشت به شکل رابطه (21) به دست می‌آید. حال می‌توان با استفاده از این رابطه و جایگذاری نیروی مطلوب، موقعیت مطلوب انگشت را محاسبه نمود.

$$N_d = K_f (q_5^d - q_{5_0}^d) \quad (21)$$

$$q_5^d = \frac{N_d}{K_f} + q_{5_0}^d \quad (22)$$

با توجه به آنچه در این بخش عنوان شد، دیاگرام کنترلی ربات برای کنترل لغزش به صورت شکل 4 طراحی می‌شود.

#### 5- کنترل به منظور مهار و جبران لغزش به طور همزمان

##### 5-1- مقدار لغزش

با استفاده از روش کنترلی بخش 4، شناسایی و کنترل لغزش انجام می‌شود؛ اما اعمال هرگونه تغییرات شتاب بر روی مفصل ربات به منظور ایجاد مانور مورد نیاز و تا زمان مهار لغزش جسم توسط کنترل کننده اعمالی، تغییرات موقعیت جسم را نسبت به پنجه به دنبال دارد. این تغییر موقعیت نسبی جسم به عنوان مقدار لغزش در نظر گرفته می‌شود.

قبل از اعمال روش مورد نظر برای جبران لغزش، به محاسبه مقدار لغزش جسم و موقعیت جدید پس از لغزش نیاز است تا بتوان با توجه به مقدار فوق تمهیدات لازم را جهت جبران آن لحاظ کرد. لذا مقدار لغزش جسم در انگشتان ربات در راستاهایی که لغزش صورت می‌گیرد با توجه به روابط (23) و (24) به دست می‌آید.

$$slip_x = X_{obj} - X_{grip} \quad (23)$$

$$slip_y = Y_{obj} - Y_{grip} \quad (24)$$

که در روابط فوق  $slip_x$  و  $slip_y$  به ترتیب مقادیر لغزش در راستای  $X_4$  و  $Y_4$  است.

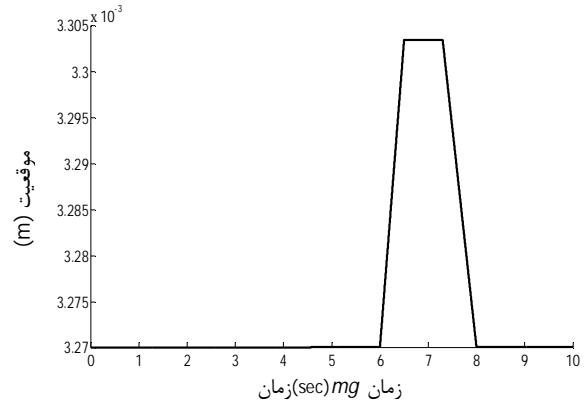
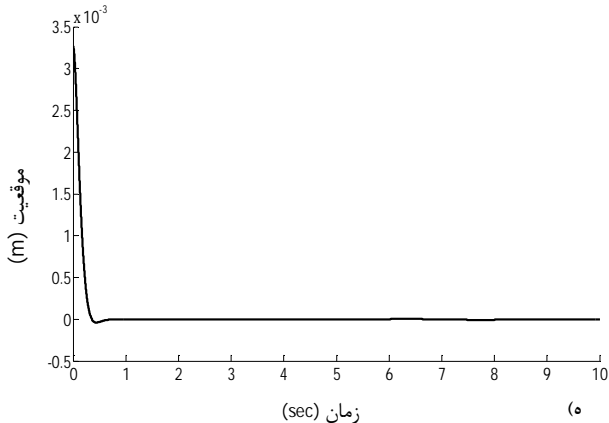
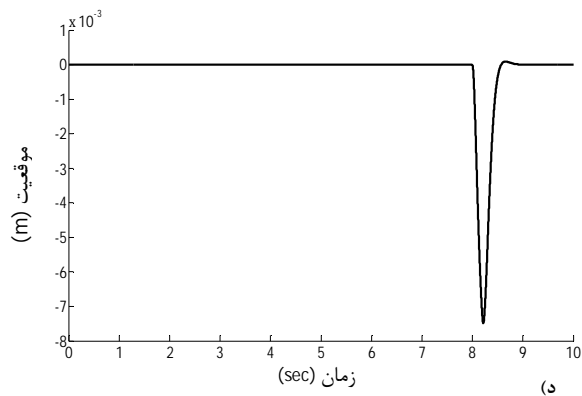
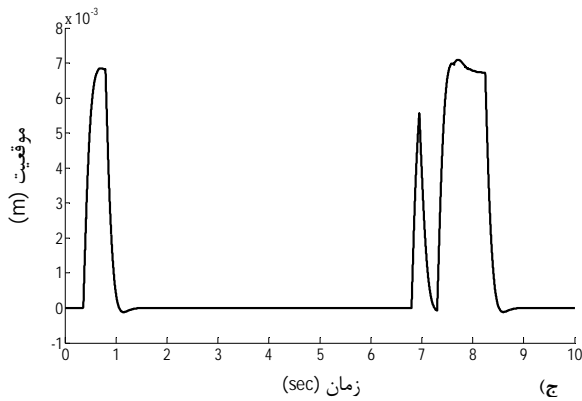
##### 5-2- جبران لغزش

همان طور که در بخش 3 اشاره شد، لغزش جسم در امتدادهای  $X_4$  و

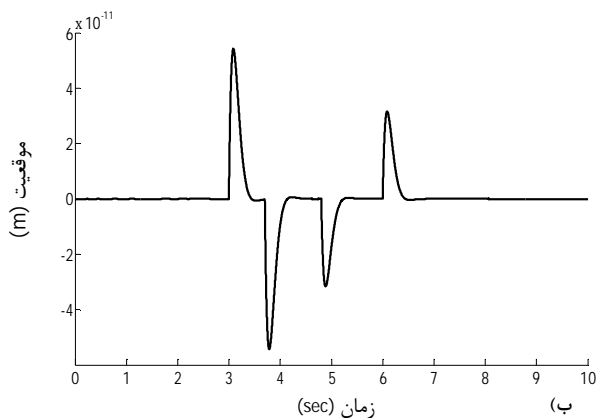
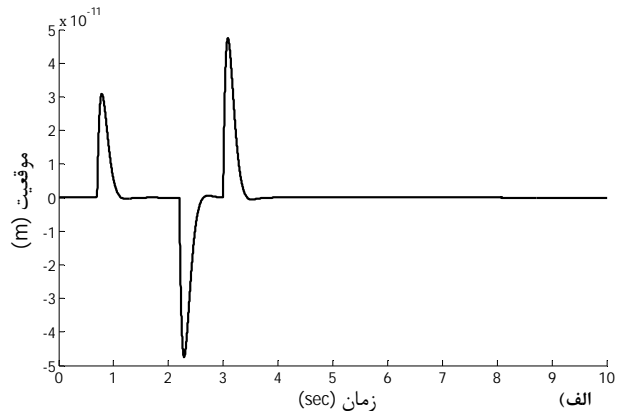
$Y_4$  رخ می‌دهد. راهکاری که در این مقاله برای جبران لغزش ارائه می‌شود

جدول 2 مشخصات ربات اسکارای طراحی شده

شماره ربات	جرم ربات (kg)	طول ربات (m)
1	$m_1 = 1/2$	$a_1 = 0/35$
2	$m_2 = 1/16$	$a_2 = 0/37$
3	$m_3 = 0/56$	$d_3 = \text{متغیر}$
4	$m_4 = 0/02$	$d_4 = 0/04$
5	$m_5 = 0/2$	$d_5 = \text{متغیر}$



شکل 5 موقعیت مطلوب انگشت

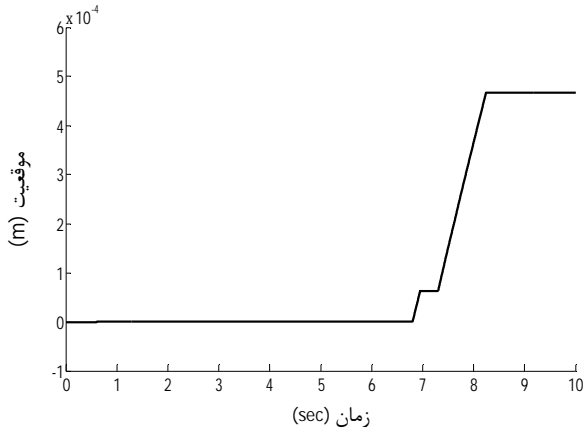


شکل 6 خطای موقعیت مفاصل ربات، الف) مفصل 1، ب) مفصل 2، ج) مفصل 3، د) مفصل 4، ه) مفصل 5

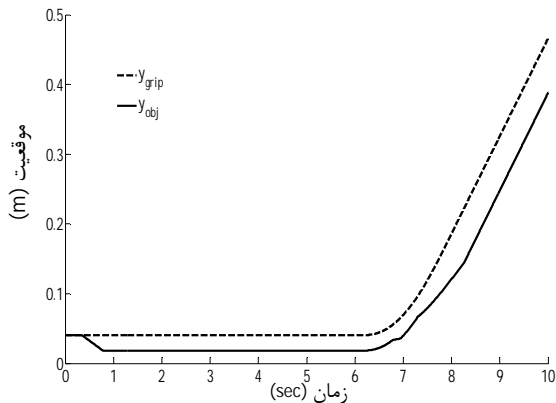
همان طور که در شکل 6 نشان داده شده، با اعمال کنترل کننده (14)، هر یک از بازوهای ربات در بازه زمانی حرکت 10 ثانیه‌ای خود مسیر مطلوب داده شده را به خوبی ردیابی می‌نمایند. به منظور کنترل سیستم مورد مطالعه، از کنترل کننده طراحی شده در شکل 4 استفاده شده است که در آن مقادیر  $K_p$  و  $K_v$  به ترتیب ماتریس‌های قطری با عناصر قطر اصلی 150 و 20 در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج مربوط به خطای ردیابی بازوی 5 که در شکل 5 ارائه شده است، مشاهده می‌شود که بعد از گذشت زمان تقریبی 1 ثانیه، ردیابی مسیر انگشت به خوبی انجام شده است. مقدار خطای ردیابی در 1 ثانیه اول نزدیک به 3/5 سانتی‌متر است و این مقدار خطا می‌تواند برای جسم در حین حرکت



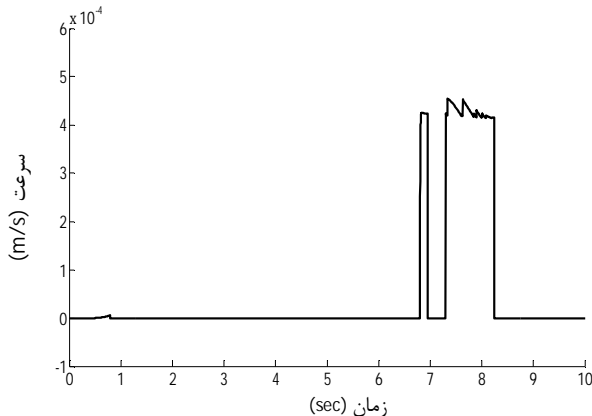
با توجه به مطالب فوق، می‌توان گفت مانور حرکتی برای ربات باعث لغزش جسم مطابق با شکل‌های 12 و 13 می‌شود. از مقایسه شکل‌های 12 و 13 مشاهده می‌شود که پس از مدت‌زمان 10 ثانیه از حرکت، جسم در هر دو راستای  $X_4$  و  $Y_4$  دچار لغزش شده است. مقدار لغزش در راستای  $X_4$  بسیار ناچیز است، درحالی‌که لغزش جسم در راستای  $Y_4$  به‌اندازه تقریبی 8 سانتی‌متر است و این مقدار با توجه به شرایط کاری در نظر گرفته‌شده ربات و ابعاد جسم و پنجه مقدار قابل توجهی است. لذا بایستی با تمهید مناسبی که در بخش 5 بیان شد، این مقدار لغزش را، همان‌طور که در قسمت بعدی نشان داده‌شده است، جبران نمود.



شکل 8 اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای  $X_4$



شکل 9 اختلاف موقعیت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای  $Y_4$



شکل 10 اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای  $X_4$

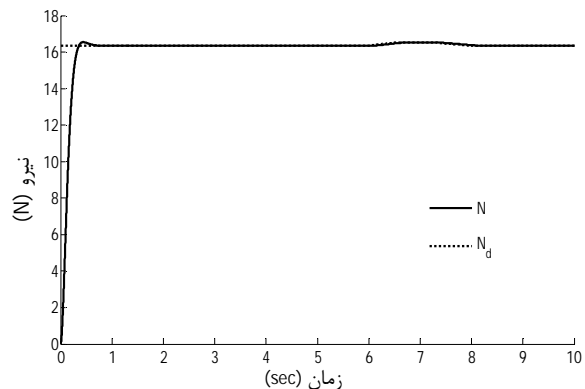
و یا در انتهای کار در زمان گذاشتن جسم توسط ربات صدماتی برای جسم، محل گذاشتن یا ربات در پیش داشته باشد.

به‌منظور بررسی وضعیت لغزش و بررسی مقدار نیروی عمودی جهت گرفتن، پس از اعمال کنترل‌کننده، نمودار آن در مقایسه با مقدار مطلوبش در شکل 7 ترسیم شده است.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، مقدار نیروی  $N$  از زمان تماس با جسم افزایش می‌یابد تا پس از گذشت زمان تقریبی 1 ثانیه به مقدار مطلوب خود برای نگه‌داشتن و مهار لغزش جسم برسد. همچنین، در نقاطی که بیشترین مقدار شتاب از سمت ربات به جسم وارد می‌شود (بین بازه زمانی 6 تا 8 ثانیه)، نیروی  $N$  متناسب با مقدار مطلوب افزایش می‌یابد و از افتادن جسم در اثر لغزش جلوگیری می‌نماید.

با توجه به مباحثی که در بخش 4 توضیح داده شد، لغزش جسم در دو راستای  $X_4$  و  $Y_4$  ایجاد می‌شود. لذا، نمودار موقعیت جسم و انگشت ربات در دو راستای  $X_4$  و  $Y_4$  برای مقایسه و نشان دادن لغزش رخ داده در شکل 8 و 9 ترسیم شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص شده، مقادیر  $Y_{obj}$  و  $X_{obj}$  با گذشت زمان از مقادیر موقعیت انگشت در راستای  $X_4$  و  $Y_4$  تبعیت می‌کنند، با این تفاوت که خطای ردیابی موقعیت جسم از پنجه در راستای محور  $X_4$  بسیار ناچیز است، در حالی که این اختلاف در راستای  $Y_4$  غیرقابل چشم‌پوشی است.

سرعت‌های جسم و پنجه ربات در راستای  $X_4$  و  $Y_4$  به‌طور جداگانه در شکل‌های 10 و 11 با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در راستای  $X_4$  بسیار ناچیز است و در این حالت سرعت جسم به‌خوبی از سرعت انگشت ربات تبعیت می‌کند. در حالی که مطابق با شکل 11، این اختلاف در راستای محور  $Y_4$  همواره صفر نیست و در بعضی از لحظات سرعت جسم با سرعت پنجه برابری نمی‌کند که این خود بیان‌کننده لغزش جسم در این لحظات است. از مقایسه شکل 11 و 7 مشاهده می‌شود که الزاماً در زمان‌هایی که سرعت جسم از سرعت پنجه تبعیت نمی‌کند، نیروی عمودی جهت گرفتن افزایش می‌یابد تا از افتادن جسم جلوگیری نماید که این مسئله نشان می‌دهد کنترل‌کننده به‌کار رفته دارای قابلیت مناسب برای افزایش نیروی عمودی اعمالی بر جسم در زمان لغزش آن است. توضیح این نکته لازم است که نیروی عمودی بعد از حذف شتاب‌های اعمالی بر جسم بر اثر مانور ربات به مقدار حداقل خود کاهش می‌یابد تا از آسیب‌رسی به جسم جلوگیری نماید.



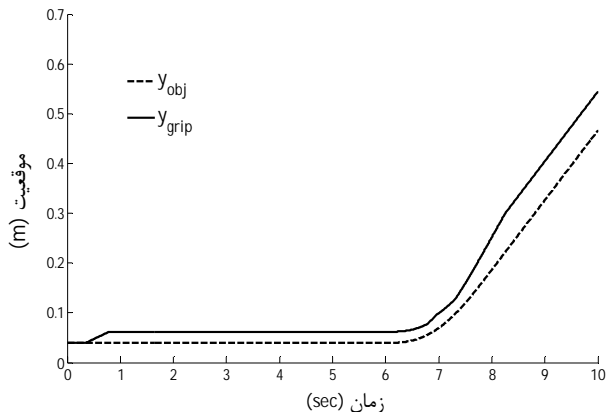
شکل 7 مقدار نیروی نرمال عمودی

این جبران سازی در شکل 14 و 15 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل 14 آمده، پس از اعمال جبران سازی لغزش در راستای محور  $Y_4$ ، موقعیت رابط 3 با توجه به موقعیت پنجه ربات تغییر می کند و دیگر مسیر مطلوب قدیمی خود را تعقیب نکرده، بلکه مسیر اصلاح شده را تعقیب خواهد نمود تا براساس این ردیابی جدید جسم در موقعیت مورد نظر قرار گیرد.

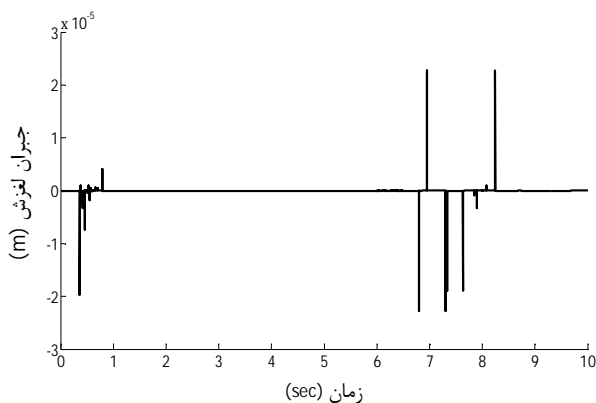
با توجه به شکل 14 و با وجود رخداد لغزش نمودار موقعیت جسم، مسیر مطلوب قدیمی مفصل کشویی 3 ربات، که جسم را در محل مناسب خود قرار می دهد، ردیابی کرده است. لذا، می توان گفت در این حالت لغزش رخ داده توسط کنترل کننده و با اصلاح مسیر مفصل کشویی 3 جبران شده است. شکل 15 نمودار لغزش جسم در راستای  $Y_4$  و پس از اعمال جبران سازی نشان داده شده است. مشاهده می شود پس از هر بار رخداد لغزش، که در اثر مانور ربات ایجاد می شود، کنترل کننده با اصلاح مسیر بازوی سوم ربات و به صورت برخط لغزش را جبران نموده و به صفر می رساند. این وضعیت تا رویداد لغزش بعدی پایدار می ماند، به طوری که در لحظات پایانی مقدار لغزش کاملاً جبران شده است.

#### 7- نتیجه گیری

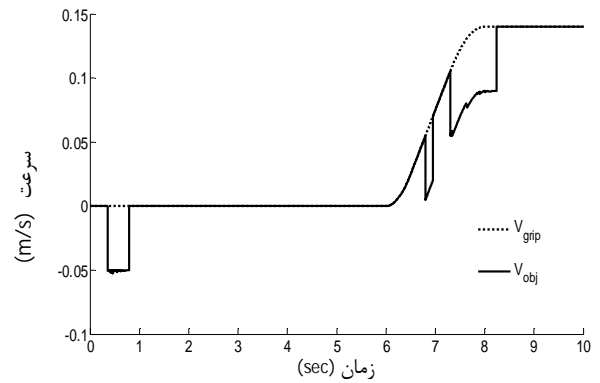
در این مقاله، لغزش رخ داده در جسم گرفته شده توسط پنجه ربات، کنترل شده و روشی جدید برای جبران سازی مقدار لغزش و تغییر موقعیت جسم نسبت به انگشتان ربات معرفی و پیاده سازی شده است. با توجه به ساختار ربات استفاده شده در این تحقیق برای گرفتن و جابه جایی جسم،



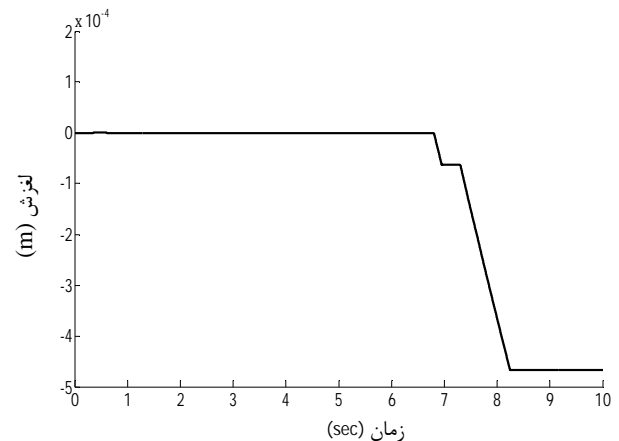
شکل 14 موقعیت جسم و پنجه نسبت به ربات با اعمال جبران ساز برخط



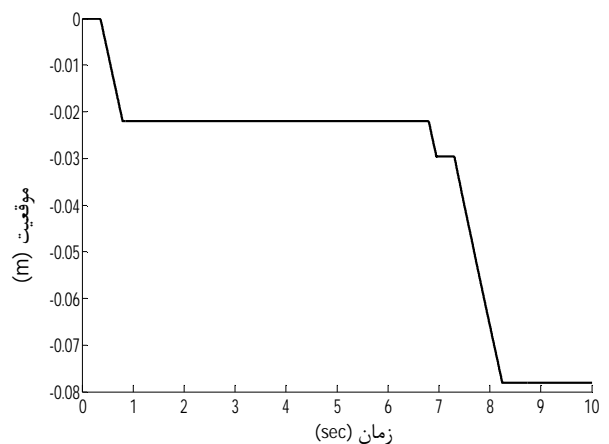
شکل 15 میزان جبران مقدار لغزش با اعمال جبران ساز برخط



شکل 11 اختلاف سرعت جسم و پنجه ربات بعد از کنترل لغزش در راستای  $Y_4$



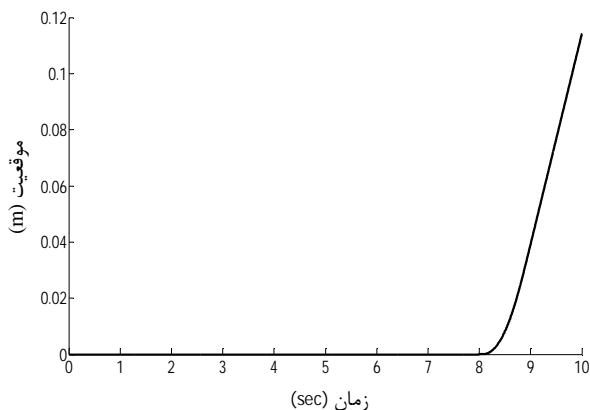
شکل 12 لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای  $X_4$



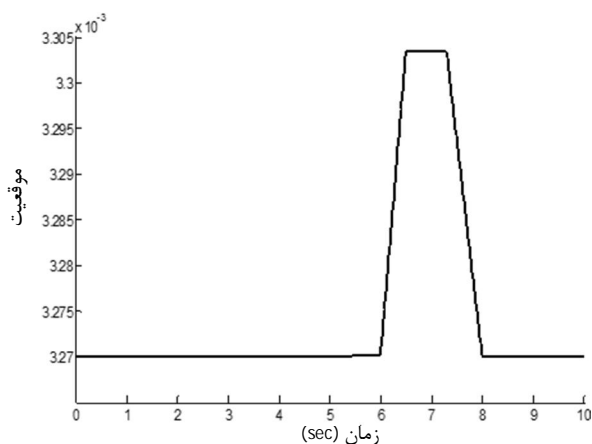
شکل 13 لغزش جسم نسبت به دستگاه پنجه ربات در راستای  $Y_4$

#### 2-6- نتایج شبیه سازی با اعمال کنترل کننده برای جبران لغزش

همان گونه که در بخش قبل نشان داده شد، میزان لغزش در راستای  $X_4$  نسبت به لغزش در راستای  $Y_4$  بسیار ناچیز است. لذا، با توجه به روش های جبران لغزش بیان شده در بخش 5-2، تنها لغزش رخ داده در راستای محور  $Y_4$  جبران می شود، هرچند با راهکاری که در این بخش ارائه شد امکان جبران لغزش در جهت  $X_4$  هم امکان پذیر است. بدین منظور، با مقایسه امتداد محورهای پنجه نسبت به مختصات مرجع، جبران لغزش ایجاد شده در امتداد محور  $Y_4$  از طریق اصلاح مسیر مفصل کشویی 3 انجام می شود. نتایج



شکل 19 مسیر مطلوب رابط 4



شکل 20 مسیر مطلوب رابط 5

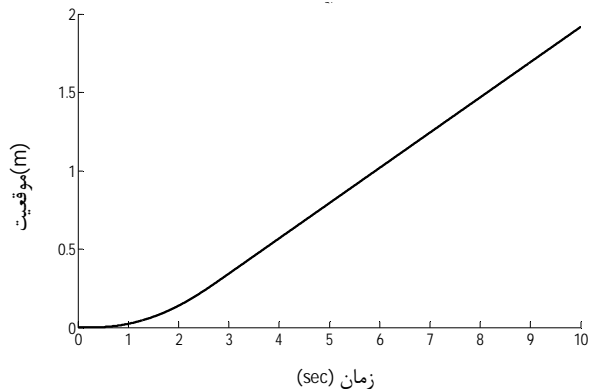
## 9- مراجع

- [1] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk, *ROBOT GRIPPERS*, First Edition, Germany: Wiley, 2007.
- [2] M. S. Lim, S. R. Oh, J. Son, B. J. You, K. B. Kim, A human-like real-time grasp synthesis method for humanoid robot hands, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 30, pp. 261-271, 2000.
- [3] A. Jamali, I. Gholaminezhad, Multi-objective optimum design of gripper mechanism using uniform diversity differential evolution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 14, 1393. (In Persian)
- [4] S. Teshigawara, T. Tsutsumi, Y. Suzuki, M. Shimojo, High Speed and High Sensitivity Slip Sensor for Dexterous Grasping, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 298-304, July 26, 2012.
- [5] E. G. M. Holweg, H. Hoeve, W. Jongkind, L. Marconi, C. Melchiorri, C. Bonivento, Slip detection by tactile sensors: algorithms and experimental results, in *Proceeding of the International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis:Minnesota, Vol. 4, pp. 3234-3239, 1996.
- [6] D. Accoto, M. T. Francomano, A. Benvenuto, C. Luccarelli, E. Guglielmelli, Optimization of a Thermal Slip Sensor using FEM and Dimensional analysis, *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, The University of Tokyo, 2010.
- [7] S. Shirafuji, K. Hosoda, Detection and prevention of slip using sensors with different properties embedded in elastic artificial skin on the basis of previous experience, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 62, No. 1, pp. 46-52, 2014.
- [8] L. Roberts, G. Singhal, R. Kaliki, Slip detection and grip adjustment using optical tracking in prosthetic hands, in *Proceeding of 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Boston, Massachusetts USA, pp. 2929-2932, 2011.

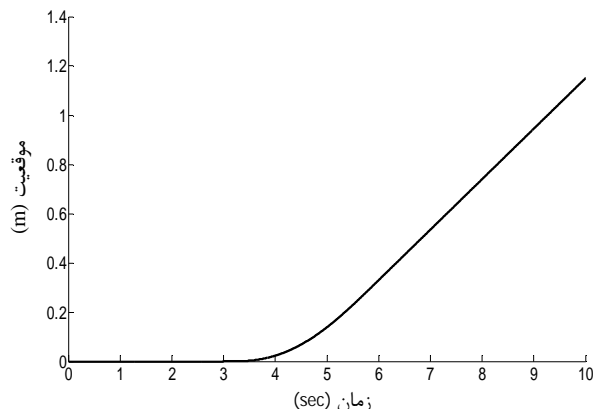
لغزش در راستای محورهای  $X_4$  و  $Y_4$  برای آن رخ می‌دهد. با اعمال روش کنترلی پیشنهادی جبران لغزش برخط انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به خوبی اصلاح موقعیت بازوی سوم ربات به اندازه مقدار لغزش جسم را نشان می‌دهد که به موجب آن پس از اعمال جبران‌ساز، جسم در موقعیت نهایی مطلوب قرار داده می‌شود.

## 8- پیوست

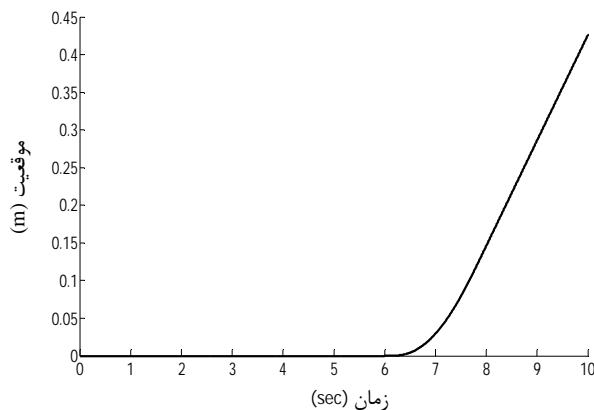
مسیرهای مطلوب بازوهای ربات در شکل‌های 16 تا 20 آورده است.



شکل 16 مسیر مطلوب رابط 1



شکل 17 مسیر مطلوب رابط 2



شکل 18 مسیر مطلوب رابط 3

- [15] H. Ahmadi, M. J. Sadigh, Safe grasping in presence of multi phase friction, in *2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision*, Hanoi, Vietnam, 2008.
- [16] E. D. Engeberg, S. G. Meek, Adaptive sliding mode control for prosthetic hands to simultaneously prevent slip and minimize deformation of grasped objects, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 18, No. 1, pp. 376-385, 2013.
- [17] S. Xiaojing, L. Hongbin, J. Bimbo, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, A novel dynamic slip prediction and compensation approach based on haptic surface exploration, in *Proceeding of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, pp. 4511-4516, 2012.
- [18] M. W. Spong, S. Hutchinson, a. M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, Second Edition, New York: Wiley, 2004.
- [19] H. Ahmadi, J. Sedigh, Safe grasping and manipulation of delicate object by a two fingers dexterous hand, *Control journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 20-35, 2010. (In Persian)
- [20] J. A. T. Machado, Portugal, J. L. M. de Carvalho, A. M. S. Galhano, Analysis of robot dynamics and compensation using classical and computed torque techniques, *IEEE Transaction*, Vol. 36 No. 4, pp. 372 - 379, August 6, 2002.
- [9] E. D. Engeberg, S. G. Meek, Adaptive object slip prevention for prosthetic hands through proportional-derivative shear force feedback, in *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 1940-1945, 2008.
- [10] M. R. Tremblay, M. R. Cutkosky, Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task, in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, Vol. 1, pp. 429-434, 1993.
- [11] A. Mingrino, A. Bucci, R. Magni, P. Dario, Slippage control in hand prostheses by sensing grasping forces and sliding motion, in *Proceeding of IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Munich, Vol.3, pp. 1803-1809, 1994.
- [12] M. M. Fateh, Variable Structure Slip Control for Grasping Objects, in *International Conference on Dynamical Systems and Control*, Bucharest, 2006.
- [13] J. K. Salisbury, B. Roth, Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 105, No. 1, pp. 35-41, 1983.
- [14] Sh. Hadian Jazi, M. Keshmiri, A New approach on object slippage control in a cooperating manipulators system, in *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, 2007.